

Les cinq premiers articles de René Thom sur la morphogénèse et la linguistique

Jean Petitot

octobre 2015

1 Introduction

Au milieu des années 1960, René Thom commença à rédiger ses premiers textes sur les applications de la théorie de la stabilité structurelle et des déploiements universels de singularités de fonctions différentiables de codimension ≤ 4 d'une part à la morphogénèse en biologie et d'autre part à la syntaxe actantielle en linguistique .

Cinq de ces articles se trouvent dans ce volume 2 des *Œuvres Complètes* :

1. *A dynamical theory for morphogenesis* [1].
2. *Une théorie dynamique de la morphogénèse* [2].
3. *Topological models in biology* [3].
4. *A mathematical approach to morphogenesis : archetypal morphologies* [4].
5. *Topologie et linguistique* [5].

Ces articles font partie de l'explosion créatrice qui conduira en quelques années à *Stabilité structurelle et Morphogénèse* [7] et à *Modèles mathématiques de la Morphogénèse* [8]. On trouvera dans ces deux ouvrages de référence un grand nombre de compléments et d'approfondissements. A partir des années 1970 les textes sur ces sujets deviendront de plus en plus nombreux (voir la *Bibliographie générale* du Volume 1).

Ces applications ne sont pas du tout du même ordre que celles dont on avait jusque là l'habitude, en particulier en physique. Elles s'insèrent dans une refonte de la notion même de *modélisation*. Comme l'indique le sous-titre

de *Stabilité structurelle et Morphogenèse : Essai d'une théorie générale des modèles* et comme René Thom n'a eu de cesse de l'affirmer, la théorie des catastrophes (TC) est un "art des modèles" :

"Ce que nous apportons ici, c'est non pas une théorie scientifique, mais bien une méthode." "Nos méthodes (...) conduiront à un *art* des modèles." ([7], p. 324)

Ces applications se situent donc au carrefour de trois filons :

1. celui d'innovations mathématiques fort importantes en topologie et en géométrie différentielles ;
2. celui d'une redéfinition des applications des mathématiques à la réalité empirique ;
3. celui d'une problématique philosophique et scientifique compliquée, celle de la morphogenèse, qui depuis l'hylémorphisme d'Aristote, a une histoire fort mouvementée.

2 La TC comme nouvelle conception de la modélisation

2.1 Présent mathématique et passé philosophique

La refonte thomienne du concept classique de modèle a réactivé de nombreux débats de philosophie des sciences et la plupart des interrogations qu'elle a pu susciter étaient dues à l'écart toujours grandissant qui s'est creusé, telle une dérive des continents, entre des mathématiques de la nature centrées sur le concept mécanique primitif de force et des philosophies de la nature centrées sur les concepts dynamiques primitifs de forme, de structure et d'organisation. D'Aristote au vitalisme du XIXe siècle, la morphogenèse biologique est demeurée du côté d'une dynamique des formes et a pâti du fait que, comme l'ont noté des générations successives de savants, une mathématique idoine restait "introuvable" et, comme le déplorait Buffon, "manquait absolument". Faute de mathématiques appropriées, ces domaines qualitatifs des sciences naturelles restaient en marge de la scientificité et les données expérimentales massives à leur sujet n'arrivaient pas à être modélisées.

L'idée directrice de René Thom était que les nouveaux outils de la théorie des singularités pouvaient offrir la mathématique "introuvable" idoine. Haute ambition théorique qui se proposait d'utiliser des résultats mathématiques d'avant garde comme levier pour résoudre des problèmes théoriques restés ouverts pendant des siècles. Dans [2] Thom vise "la synthèse (...) des pensées 'vitaliste' et 'mécaniste' en Biologie". Dans [4] il explique :

"What I offer you is a radically new point of view for biological problems."

Une telle ambition était-elle démesurée? En fait, Thom s'était rendu compte que ce que l'on pourrait appeler le "supplément de géométrie" fourni par la notion de déploiement universel venait combler le "manque de géométrie" diagnostiqué depuis longtemps en morphogenèse et permettait de géométriser les concepts fondamentaux de "chréode", de "champ morphogénétique" ou de "paysage épigénétique" utilisés par le grand embryologiste Conrad Hal Waddington. C'est bien là "l'origine de la théorie" comme il l'écrivit dès le §1.1. de ce qu'il qualifiait lui-même d'"article princeps" [2].

La conscience aiguë du fait que l'avènement de modèles mathématiques pour les phénomènes critiques, les ruptures de symétries, l'apparition de patterns et de morphologies constituait un événement scientifique majeur était d'ailleurs partagée par plusieurs savants des années 1960-1970 et faisait partie d'un vaste bouillonnement d'idées. La TC y rencontrait, parfois avec quelques polémiques, les "structures dissipatives" d'Ilya Prigogine, la "synergétique" de Hermann Haken, ou "l'ordre à partir du bruit" de Henri Atlan. Il suffit de se rappeler le début de *La nouvelle alliance* [P-S] d'Ilya Prigogine et Isabelle Stengers qui met en scène le célèbre *Entretien* de 1769 entre d'Alembert, défenseur de la mécanique rationnelle quantitative mathématisée, et Diderot, défenseur de l'embryogenèse qualitative non mathématisée, pour se convaincre, d'une part, de l'épaisseur historique et philosophique des problèmes et, d'autre part, de la conscience qu'avaient ces auteurs de l'enjeu innovant de leurs modèles.

3 Les articles du volume 2

Les cinq articles de ce volume ont été publiés entre 1966 et 1970. Quatre sont consacrés à la morphogenèse biologique et un à la linguistique.

3.1 “Une théorie dynamique de la morphogenèse”

Écrit en 1966, [2] est, selon ce que déclare Thom dans le chapeau de sa réédition comme chapitre 1 de la 2ème édition de *Modèles mathématiques de la Morphogenèse* [8], “l’article ‘Princeps’ de la Théorie des Catastrophes”. René Thom y définit ce qu’il entend précisément par “morphogenèse” (§1), y présente son modèle général de base (§2) et le raffine pour la biologie (§3). L’article a été publié en 1968 dans le tome 1 de *Towards a Theoretical Biology*, série de Proceedings éditée par Waddington qui a fortement soutenu René Thom dans son aventure intellectuelle.

3.2 “A dynamical theory for morphogenesis”

Egalement écrit en 1966 et présenté dans un colloque tenu au Japon à Katada, [1] résume le modèle de base.¹

3.3 “Topological models in biology”

Publié en 1969 et réédité dans le tome 3 de *Towards a Theoretical Biology*, [3] reprend le modèle morphogénétique de base mais en partant du concept primitif de *stabilité structurelle* qui sera utilisé dans le titre de l’ouvrage [7]. Cette focalisation est essentielle. En effet les modèles thomiens reposent en grande partie sur les déploiements universels d’instabilités de systèmes dynamiques. D’emblée Thom explique que la théorie mathématique de la stabilité structurelle

“seems to offer far reaching possibilities to attack the problem of the stability of self-reproducing structures, like the living beings.”

Et il ajoute, que ce problème “is one of the outstanding questions in present days Biology”.

Mais la notion de stabilité structurelle dépasse de beaucoup le domaine biologique. Thom introduit alors la notion de “modèle sémantique” destinée à s’appliquer à tous les domaines où il y a structure, de la biologie à la linguistique. Dès le départ donc, il entrevoit la possibilité d’élaborer un *langage* des formes, muni d’une “syntaxe” et d’une “sémantique”, dont les unités seraient des “chréodes” au sens de Waddington, c’est-à-dire des

1. Grâce à Tadashi Tokieda, Alain Chenciner a pu se procurer l’original de ce texte difficile à retrouver.

champs morphogénétiques locaux élémentaires modélisables par des catastrophes élémentaires (CE).

3.4 “A mathematical approach to morphogenesis : archetypal morphologies”

Exposé dans un colloque qui s’est tenu les 22-23 octobre 1968 au *Wistar Institute of Anatomy and Biology* de Tel Aviv, [4] reprend le modèle et présente un double intérêt. D’abord il introduit la notion de “morphologies archétypes” déductibles “des interactions spatiales les plus générales” et, comme les “chréodes”, applicables aussi bien à la biologie qu’à la linguistique. Ensuite il a fait l’objet d’un des premiers débats avec des généticiens (nous allons y revenir).

3.5 “Topologie et linguistique”

Paru en 1970 dans le colloque de Rham édité par André Haefliger et Raghavan Narasimhan, [5] est, avec *Topologie et signification* [6], l’article princeps des applications de la TC à la linguistique. Dans le chapeau de sa réédition dans la 2ème édition de *Modèles mathématiques de la Morphogenèse* [8], René Thom y affirme que

“c’est l’article le plus élaboré concernant les morphologies archétypes associées aux verbes.”

Il y évoque très brièvement le contexte de la sémio-linguistique depuis la révolution structuraliste introduite par Ferdinand de Saussure et développée en particulier par Roman Jakobson. De même que Waddington a été le soutien de Thom en biologie théorique, de même Jakobson a été son soutien en linguistique. Il s’agissait d’un vrai soutien puisque Jakobson est allé jusqu’à dire que, outre lui-même, il ne connaissait que quatre authentiques structuralistes : Saussure, le Prince Troubetskoï, Lévi-Strauss et Thom.

En ce qui concerne la syntaxe, Thom développe de façon détaillée dans cet article les morphologies archétypes et les graphes actantiels dérivables des CE. En ce qui concerne la sémantique, il part des travaux de Christopher Zeeman sur la dynamique des états mentaux et de leur flux temporel.

4 TC, discontinuités qualitatives et phénoménologie

La méthodologie qualitative thomienne élargit les modèles classiques de type physique (à base d'équations différentielles) à une philosophie des sciences non classique. Ce “morphological turn” va très loin, puisque, d'emblée, Thom identifie explicitement la notion de morphologie à celle de *phénomène*. Au-delà de son souci de modéliser telle ou telle classe de morphologies empiriques, se fait ainsi jour la volonté de refonder mathématiquement le concept primitif de “phénomène”, un peu comme en mécanique classique on avait identifié, via le calcul différentiel, “phénomène” et “mouvement” ou comme en mécanique quantique on avait identifié, via la théorie des opérateurs sur les espaces de Hilbert, “phénomène” et “observable”.

Au symposium de Katada de 1967 [1], Thom définit un phénomène naturel dans un domaine $U \subset \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}$ de l'espace-temps par l'opposition entre les points phénoménologiquement réguliers au voisinage desquels le substrat est localement homogène et les points phénoménologiquement singuliers au voisinage desquels le substrat est rendu localement hétérogène par des discontinuités qualitatives. Au début de [2], il explique que

“le propre de toute forme, de toute morphologie est de s'exprimer par une discontinuité des propriétés du milieu.”

Il affirme également dans [3] que toute morphologie repose sur des discontinuités. Il s'agit d'un leitmotiv : “phénomène” \equiv “morphologie” \equiv “points réguliers/singuliers” \equiv “système de discontinuités qualitatives”. Ces identifications sont importantes car elles soulignent le fait que Thom veut dégager les principes permettant de réintégrer dans le domaine scientifique une sorte de “part maudite”. En effet, comme il y insiste dans [2],

“rien ne met plus mal à l'aise un mathématicien qu'une discontinuité, car tout modèle quantitatif utilisable repose sur l'emploi de fonctions analytiques, donc continues.”

Les scientifiques classiques n'aimaient pas les discontinuités et cherchaient à les éliminer. Il n'était donc pas pertinent pour eux de se focaliser sur des phénomènes pour lesquels le concept de discontinuité est *constitutif*.

Il y a chez Thom un retournement complet de la valeur attribuée aux singularités et aux discontinuités. Au lieu de les considérer comme des “mauvais” objets, il les considère comme des objets “excellents”, phénoménologiquement dominants, en lesquels se concentre l'information pertinente. Il rejoint sur ce

point de nombreux psychologues de la perception depuis Brentano et des phénoménologues comme Husserl et Merleau-Ponty.

5 Structuralisme biologique VS biologie moléculaire : information positionnelle et homéogènes

La validité des modèles locaux de morphogenèse – qu’ils soient statiques (dynamiques de gradient) ou métaboliques (dynamiques générales) – sont des modèles de champs morphogénétiques à la Child-Waddington présupposant que, si les gènes contrôlent bien les différenciations cellulaires, ils ne sont pas pour autant la cause des morphologies observées. Selon Thom, les morphologies sont contraintes par des contraintes topologico-géométriques “platoniciennes” imposées par le principe de stabilité structurelle et résultent de l’action de ce que l’on appelait à l’époque *l’information positionnelle*.

A l’époque (années 1960) il existait un antagonisme marqué entre une encore jeune biologie moléculaire et un *structuralisme* embryologique, antagonisme hérité du conflit virulent entre biochimie et vitalisme de la seconde moitié du XIXe siècle, le vitalisme affirmant que l’organisation morphologique du vivant procédait d’un principe organisateur vital irréductible à des mécanismes physico-chimiques. Au début du XXe siècle les grands embryologistes Hans Driesch (1867-1941) et Hans Spemann (1869-1941, Nobel 1935 pour la découverte de l’induction embryologique et inventeur du concept de centre organisateur) étaient encore vitalistes de façon déclarée.

Même si les structuralistes comme Waddington, Brian Goodwin ou Gerry Webster (cf. [WG]) n’étaient plus vitalistes au sens du XIXe siècle, ils maintenaient fortement la thèse que les processus de morphogenèse et l’expression du génotype par le phénotype resteraient incompréhensibles tant qu’on n’aurait pas donné un statut scientifique rigoureux à la notion d’information positionnelle contrôlant la différenciation cellulaire (cf. [P85]).

Thom est entré de plain pied dans ce débat en offrant aux structuralistes l’appui de ses nouvelles mathématiques. D’où une dure controverse avec les tenants de la biologie moléculaire. Ce débat, passionnant sur le plan des idées, était un avatar d’un des différends les plus récurrents des sciences modernes, remontant avant *l’Entretien*, déjà évoqué, entre Diderot et d’Alembert.

Il est toutefois en passe d’être en partie résolu depuis les travaux d’Edward Lewis (Nobel 1995) sur les *gènes homéotiques* qui marquent la position

d'une cellule. Les homéogènes sont des gènes de régulation déterminant les sites où certaines structures anatomiques vont se développer. Ils encodent les facteurs de transcription contrôlant l'expression des gènes pour les structures anatomiques. Comme le remarquait en 2007 Alain Prochiantz dans la Leçon inaugurale de sa chaire *Processus morphogénétiques* du Collège de France, jusqu'aux années 1980, le développement était conçu avant tout comme une affaire de différenciation cellulaire, et donc d'expression de gènes, la question des assemblages morphologiques n'étant que peu abordée par la biologie moléculaire. Situation – contexte des premiers travaux de Thom – qui a radicalement changé avec la découverte en 1991 des homéoprotéines qui sont des signatures moléculaires de la position des cellules qui les expriment, peuvent franchir les membranes cellulaires et agir comme des *morphogènes diffusants*. Cela relie position et différenciation par un mécanisme qui ressemble énormément à celui dont d'abord Turing puis Thom ressentaient le besoin.

Par ailleurs de nouvelles méthodes d'imagerie ont permis récemment la reconstruction quantitative de l'embryogenèse et la modélisation des comportements cellulaires précoces. Avec des outils de microscopie multiphotonique à balayage on a pu enregistrer des signaux de mitose et des variations de propriétés optiques des membranes permettant de reconstruire positions, contacts, différenciations, lignages, trajets et migrations cellulaires. Ces données empiriques quantitatives sont remarquablement compatibles avec des modèles thomiens.

6 Mécanisme et hylémorphisme

Pour évaluer les travaux de Thom en biologie, il est important de tenir compte de l'épaisseur philosophique et historique du problème de la forme. En effet, dès le début, Thom s'est considéré comme le mathématicien de l'hylémorphisme aristotélicien. Et au cours des années son rapport à Aristote devint de plus en plus profond. Après la biologie et la linguistique, après les nombreuses réflexions d'épistémologie des modèles, après l'*Esquisse d'une sémiophysique* (1988) et l'*Apologie du Logos* (1990) l'hylémorphisme est devenu toujours plus central dans sa réflexion. Le lecteur pourra consulter quelques items de la Bibliographie générale du volume 1, [246] (1990), [265] (1991), [291] (1994), [305] (1995), [316] (1997, "The hylemorphic schema in mathematics"), [319] (1998), [322] (1999, "Aristote topologue", un des der-

niers articles),

Pendant des siècles, certains parmi les plus grands penseurs ont toute leur vie tourné autour des apories de l'hylémorphisme, comme d'autres l'ont fait, également pendant des siècles, pour le paradoxe de Zenon, l'indépendance du Ve postulat d'Euclide ou la transcendance de π .

Il suffit de citer le cas de Leibniz, qui est exemplaire. Toute sa vie, Leibniz a été tourmenté par le fait que le triomphe de la mécanique (dont il fut l'un des principaux acteurs) avait rendu incompréhensible toute dynamique des formes car celle-ci ne pouvait pas se passer de concepts aristotéliens comme ceux d'entéléchie ou de forme substantielle. L'antinomie est la suivante. Dans la conception mécaniste où seules "la figure, la grandeur et le mouvement" (comme on disait à l'époque) sont objectifs, les corps du monde sensible ne sont pas des "substances composées" mais seulement des agrégats dont l'unité et l'individuation ne sont que mentales et nominales, résultent de la perception et du langage qui découpent dans la réalité des unités phénoménales, et ne sont par conséquent qu'apparentes. Or, dans une lettre du 2 février 1706 à des Bosses Leibniz explique :

"outre la figure, la grandeur et le mouvement, il faut admettre des formes au moyen desquelles la différence des apparences surgisse dans la matière, formes qu'on ne peut intelligiblement chercher, me semble-t-il, qu'à partir des entéléchies."

Si l'on pense de façon non plus nominaliste mais réaliste que les corps sont des substances composées qui possèdent un répondant ontologique *per se*, alors il faut comprendre comment la matière peut s'organiser morphologiquement et, d'une façon ou d'une autre, refaire droit à l'hylémorphisme. Rejet, entre 1668 et 1671, des formes substantielles au profit d'un pan-mécanisme ; leur réhabilitation à partir de 1679 dans la correspondance avec Arnauld ; nouveau rejet ; réhabilitation des entéléchies en 1691 comme "le principe de l'actualité et de la réalité dont la forme substantielle n'est plus que l'application aux substances vivantes et aux substances corporelles" ([Ro], p. 64) ; à partir de 1696, la Monadologie permet de faire la synthèse entre l'entéléchie et la matière première et d'élaborer les concepts d'action et d'énergie ; entre 1712 et 1716, le "vinculum substantiale" essaye de comprendre comment au-delà des formes substantielles, des entéléchies et des monades qui ne font que "conférer l'unité de la forme à la matière première" (ibid. p. 89), les corps peuvent être d'authentiques "automates systémiques" se manifestant comme complexes de "discontinuités observées dans la matière-étendue" (ibid. p.

29).

Après Leibniz, il y aura les Lumières françaises et les débats de type Diderot-d'Alembert. Après les Lumières françaises, il y aura l'*Aufklärung* allemande et la façon dont Kant, confronté à son tour à l'antinomie de l'organisation du vivant, au statut non mécanique de sa "bildende Kraft" (force formatrice interne) et à l'aporie de sa "finalité interne objective" a dû écrire une troisième Critique, la *Critique de la Faculté de Juger* de 1790, qui, comme l'a souligné Ernst Cassirer [Ca], est la solution transcendantale apportée au problème hylémorphique aristotélicien des formes substantielles et des entéléchies permettant de penser les formes comme immanentes à la matière.

Après le criticisme, Goethe va toute sa vie réfléchir sur l'organisation biologique comme "finalité interne objective". Il va fonder, sous le nom de *Morphologie*, un premier structuralisme dynamique. On connaît sa passion pour le débat Cuvier / Geoffroy Saint-Hilaire sur les corrélations et le plan d'organisation des êtres vivants. En étudiant toute sa vie la morphogenèse des plantes – qu'il appelait aussi "Métamorphose" –, il a élaboré une doctrine de la Morphologie qu'il a appliquée à la fois aux formes naturelles et aux structures plastiques. On trouve chez Goethe l'intuition d'un principe "entéléchique" dynamique interne engendrant la connexion spatiale externe des parties dans un organisme (ce qu'il appelait les "corrélations").

Dans la seconde moitié du XIXe siècle le mécanisme physicaliste, devenu biochimie, combatta ces orientations vitalistes. Mais le filon Leibniz-Kant-Goethe ne disparaîtra pas complètement. Devenu résiduel en biologie il a eu en revanche une postérité fondamentale en sciences du langage et il est l'une des sources principales du structuralisme de Jakobson que Thom s'est également proposé de modéliser. En effet, les intuitions goethéennes en sont à l'origine : la Morphologie a inspiré le formalisme russe qui est à l'origine du structuralisme de Jakobson ; Claude Lévi-Strauss [L-S], se réclamait lui aussi du naturalisme de Goethe à partir de D'Arcy Thompson :

"Elle [la notion de structure comme transformation] me vient d'un ouvrage qui a joué pour moi un rôle décisif et que j'ai lu pendant la guerre aux Etats-Unis : *On Growth and Form* (...) de D'Arcy Thompson. (...) Ce fut une illumination, d'autant que j'allais vite m'apercevoir que cette façon de voir s'inscrivait dans une longue tradition : derrière Thompson, il y avait la botanique de Goethe (...)."

7 Vers un réalisme sémiophysique

Les modèles de Thom se sont développés en biologie et en sémio-linguistique en rendant ces deux domaines solidaires, en offrant à la première une théorie originale des liens entre structure et fonction et à la seconde une théorie originale des liens entre syntaxe et sémantique. Ce parallélisme conduit à des conclusions qui, comme le disait Thom lui-même, sont “difficiles à admettre”. En particulier, Thom s’estimait justifié à défendre un réalisme sémiotique immanent à la Nature. Il formule cela fort bien dans *Topologie et Signification* [6], son autre texte “princeps” de 1968 sur la sémiolinguistique :

“Ne peut-on admettre que les facteurs d’invariance phénoménologique qui créent chez l’observateur le sentiment de la signification proviennent de propriétés *réelles* des objets du monde extérieur, et manifestent la présence *objective* d’entités formelles liées à ces objets, et dont on dira qu’elles sont ‘porteuses de signification’ ?”

L’un des principaux apports de Thom pour l’épistémologie de la modélisation est d’avoir dégagé ces *entités formelles*.

Bibliographie des cinq articles de René Thom

- [1] A dynamical theory for morphogenesis, *Katada symposium on Topology*. Private publication, February 1967, p. 1–11.
- [2] Une théorie dynamique de la morphogénèse, *C.H. Waddington (Ed.) Towards a theoretical biology I*, University of Edinburgh Press, 1968, p. 152–166, suivi d’une correspondance avec C.H. Waddington.
- [3] Topological models in biology. *Topology*, **8**, 1969, p. 313–335.
- [4] A mathematical approach to morphogenesis : archetypal morphologies. *Heterospecific genome interaction (Wistar Institute of Anatomy and Biology, October 22-23, 1968)*. Wistar Institute Press, 1969, p. 165–174.
- [5] Topologie et linguistique, *Essays on topology and related topics (mémoires dédiés à Georges de Rham)*, A. Haefliger and R. Narasimhan (Ed.), Springer, 1970, p. 226–248.

Bibliographie complémentaire de René Thom

- [6] Topologie et signification, in *L'Âge de la science*, **4**, Paris, Dunod, 1968, p. 1–24 [réédité comme chapitre 10 de [8], p. 193–228 ; réédité comme section 2 du chapitre 10 de [?], 1980, p. 167–192, avec un chapeau].
- [7] *Stabilité structurelle et morphogénèse. Essai d'une théorie générale des modèles*. Mathematical Physics Monograph Series. W. A. Benjamin, Inc., Reading, Mass., 1972.
- [8] *Modèles mathématiques de la morphogénèse*, Paris, 10-18 UGE, 1974 (Deuxième édition 1980)

Bibliographie complémentaire

- [D'Ar] D'Arcy Thompson, 1942. *On Growth and Form*, Cambridge University Press, Cambridge.
- [Ca] Cassirer, E., (1923) *Das Erkenntnisproblem in der Philosophie und der Wissenschaft der neueren Zeit*, Berlin, 1923.
- [Goe] Goethe, J. W. von, 1780-1830. *La Métamorphose des Plantes* (trad. H. Bideau), Paris, Triades, 1975.
- [Ja] Jakobson, R. *Essais de linguistique générale*, Paris, Editions de Minuit, 1963 (T.1), 1973 (T.2).
- [L-S] Lévi-Strauss, C., 1988. *De Près et de Loin*, Paris, Odile Jacob.
- [P85] Petitot, J. (1985). *Morphogénèse du Sens*, Paris, Presses Universitaires de France. *Morphogenesis of Meaning* , transl. F. Manjali. Bern : Peter Lang, 2003.
- [P-S] Prigogine, I., Stengers, I., *La Nouvelle Alliance*, Gallimard, Paris, 1979.
- [Ro] Robinet, A. *Architectonique disjonctive, Automates systémiques et Idéalité transcendantale dans l'oeuvre de G. W. Leibniz*, Paris, Vrin, 1986.
- [Tu] Turing, A.M. The Chemical Basis of Morphogenesis, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B, Biological Sciences*, **237**, 641(1952) 37-72.
- [Wa1] Waddington, C.H. *An introduction to modern genetics*, New York, The Macmillan company, 1939.
- [Wa2] Waddington, C.H. *Organizers and Genes*, Cambridge University Press, Cambridge, 1940.

[WG] Webster, G., Goodwin, B., *Form and Transformation : Generative and Relational Principles in Biology*, Cambridge University Press, 1996.